

**EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DEL MEJORAMIENTO DE VIA EN EL MUNICIPIO DE
CARURÚ DEPARTAMENTO DEL VAUPÉS: CON TECNOLOGÍA DE LOSAS CORTAS.**

GONZALO GUZMÁN HERNANDEZ

TRABAJO DE GRADO

ASESOR:

ING. JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTINEZ
Coordinador Especialización en Ingeniería de Pavimentos

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTÁ
2020



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



- Copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- Hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	4
Problema	4
Pregunta de investigación	5
Antecedentes y estado del arte	5
Justificación	6
2. OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo general	7
2.2 Objetivos específicos	7
3 TEMÁTICA O CONCEPTUAL	8
3.1 Marco teórico	8
4 METODOLOGÍA	9
4.1 Localización geográfica	9
4.2 Evaluación de la condición actual de la vía	10
4.3 Variable subrasante y materiales: fase experimental	10
4.4 Variable tránsito	12
4.5 Diseño de pavimentos	13
4.5.1 Losas cortas	13
4.5.2 Pavimento rígido	19
4.5.3 Placa huella	20
4.6 Criterios de falla	22
5. RESULTADOS	24
5.1 Losas cortas software EverFE2.26	24
5.2 Pavimento Rígido	27
6. ANÁLISIS ECONÓMICOS DE LAS ALTERNATIVAS EVALUADAS	31
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32
REFERENCIAS	33

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto tiene como principal objetivo presentar tres alternativas de estructuras de pavimento para la falta de infraestructura vial en el municipio. El mejoramiento de la vía que comunica el internado sede secundaria del colegio Pluriétnico de Carurú “COLPEC” al casco urbano del municipio de Carurú, Departamento del Vaupés se muestra como solución al problema de movilidad (comodidad, seguridad y funcionalidad). Se pretende evaluar las alternativas de losas cortas, pavimento rígido y placa huella. Lo anterior, con el fin de escoger la alternativa más eficiente, técnica y económicamente viable, que garantice el mejoramiento de la vía y seguridad de los estudiantes que a diario deben movilizarse a pie desde el casco urbano hasta la institución educativa. Por otra parte, se pretende que la implementación del proyecto beneficiara a los habitantes del municipio que transitan por esta vía ya que se podrá aprovechar para fomentar deporte y trabajo debido a que los indígenas pueden trasladar con mayor facilidad sus productos agrícolas al casco urbano.

Problema

La falta de recursos para el mantenimiento de las vías de tercer orden, a nivel nacional, Departamental y Municipal, ha ocasionado el abandono por parte de las entidades estatales, originando daños continuos como las grietas, asentamientos, daños en las juntas que pueden ser irreversibles en su estructura.

Dicha problemática se ve reflejada en la vía que comunica el casco urbano del Municipio de Carurú y el Colegio Pluriétnico del Municipio de Carurú, institución educativa que entre otras cosas es el único internado de la zona del gran resguardo indígena de Carurú, donde el abandono del tramo en estudio ha ocasionado deterioro en toda la estructura vial, afectando notoriamente la transitabilidad en el sector, factor que influye en forma directa en los usuarios, dificultando el transporte de mercancías, y otras consecuencias como son: aumento en el costo del mantenimiento automotor, aumento en los tiempos de viaje, incremento considerable para la reparación de la vía, disminución de los ingresos por turismo y aumento de las enfermedades bronco-respiratorias, así como un atraso en el desarrollo de la región.

El tramo de diseño no cuenta con los aspectos mínimos para el tránsito de vehículos en términos estructurales, funcionales y de durabilidad. Esto se debe a que no cuenta con una estructura de pavimento y que el suelo natural (subrasante) es principalmente arcilloso de baja capacidad portante ante el aumento de la humedad del suelo, lo cual es notable en el periodo de invierno. Este tramo requiere de la construcción de obras de drenaje tales como cunetas, sumideros para la recolección y conducción de las aguas

lluvias, así como de las obras de mejoramiento.

Por este motivo se hace necesario buscar una alternativa que sea viable tanto técnica como económica, mediante la implementación de un diseño de pavimento que permita conservar la estructura.

Pregunta de investigación

¿Cuál alternativa de diseño para la estructura vial, podría aplicarse en la vía terciaria que comunica el colegio Pluriétnico con el Municipio de Carurú Departamento del Vaupés, que ofrezca durabilidad y sea económicamente viable?

Antecedentes y estado del arte

La vía objeto de este estudio pertenecen a la red rural del Municipio de Carurú, Departamento del Vaupés. A lo largo de todo el tramo, la vía se encuentra sin estructura de pavimento, su superficie está expuesta a la intemperie, por lo que se encuentra bastante afectada por las aguas lluvias. En la actualidad la totalidad del tramo cuenta con andenes contruidos y funcionales, por lo que el paso peatonal se considera como garantizado.

Debido a la complejidad del estudio es necesario realizar el diseño definitivo de la señalización vial preventiva e informativa, con el objetivo no solo de cumplir la normatividad en este campo si no para ofrecer o proporcionar una adecuada seguridad a los peatones, ciclistas, motociclistas y conductores de las vías adyacentes, advirtiéndolos su cercanía a la zona de ejecución de las obras y delimitando los espacios de circulación restringida.

El análisis de la estructura de pavimento tiene como principal directriz optimizar los recursos disponibles para lograr establecer una obra donde exista un equilibrio entre el beneficio esperado y la inversión destinada, además de lo anterior es importante establecer que toda estructura de pavimento, cuenta con una curva de deterioro ajustado a diversos factores que afectan su funcionalidad y en la cual se establecen una serie de mantenimientos periódicos encaminados a recuperar el índice de servicio de la vía a lo largo de su vida útil.

Para dar respuesta a los inconvenientes antes mencionados se analiza la implementación de losas cortas o de geometría optimizada (reducción espesores), las cuales generan una mejor distribución de los esfuerzos de acuerdo con las dimensiones de la losa (largo y ancho). Cuanto se tienen losas más cortas, estos esfuerzos disminuyen por las menores dimensiones que pueden soportar grandes cargas y tener una vida útil

mayor. Al tener juntas más cortas hacen que las losas se doblen y se desvíen menos, menores esfuerzos a flexión y disminuye el estrés o la tensión sobre el concreto. Aunque en Colombia se tienen pocas experiencias con este tipo de pavimentos, algunos países de sur y Centroamérica como Perú, Argentina, Chile, Uruguay y Guatemala han adoptado este método constructivo con éxito disminuyendo el costo.

Ejemplos claros como en Guatemala con longitudes de 12, 7, y 1.6 kilómetros en soluciones convencionales AASHTO con espesores de 25, 26 y 30 centímetros se han logrado soluciones finales de losas cortas con espesores de 18, 20 y 26 centímetros. El método constructivo adoptado en estos países ha disminuido espesores de 4 a 10 cm sin considerar barras de transferencia de carga, ni sello en las juntas. Este tipo de pavimentos se han usado no sólo en vías de bajo tránsito, sino también en vías de tráfico pesado.

Justificación

El colegio Pluriétnico del municipio de Carurú es el único colegio que brinda la oportunidad de albergar estudiantes de distintas zonas de comunidades indígenas cercanas al casco urbano del municipio, actualmente dicha institución tiene 444 alumnos matriculados cuyo nivel académico es de secundaria, el transporte escolar actual es vía fluvial, muchos de ellos llegan tarde al colegio ya que prefieren irse caminando pero llegan tarde o muchas veces sucios por caminar en la vía que no está pavimentada. Si se pavimenta se puede estimular la utilización de la bicicleta como medio de transporte, ya que favorece en los estilos de vida saludables enmarcados en la ley 1355 de 2009; por medio de la cual se define la obesidad como una prioridad de salud de la población joven de la Orinoco Amazonia.

La construcción de pavimentos será de gran provecho para la rehabilitación, mejoramiento y mantenimiento de las vías pertenecientes a la malla vial terciaria de Colombia, las cuales están a cargo del Instituto Nacional de Vías – INVIAS; es precisamente esta misma institución quien ha llevado progreso a numerosas regiones de Colombia para el mejoramiento vial y económico frente a las alternativas tradicionales en concreto rígido, o concreto asfáltico. Además, que con su posterior construcción brinde a los usuarios comodidad, seguridad, y una mayor calidad de vida a los peatones y habitantes del sector.

Por esta razón surge la necesidad de determinar acciones que permitan buscar alternativas de diseño de pavimentos que serán de vital importancia en este caso de estudio.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Comparar las alternativas de diseño para losas cortas, pavimento rígido y placas huellas en el tramo ubicado desde el k1+000 al k2+000 de la vía que comunica el Municipio de Carurú al Colegio Pluriétnico del Gran resguardo Indígena del Vaupés.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar el estado actual de la malla vial que comunica el Colegio con el casco urbano del Municipio de Carurú.
- Comparar técnicamente y económicamente los tres (3) tipos de estructuras de pavimentos: losas cortas, pavimento rígido y placa huella.
- Identificar la mejor alternativa de pavimentación en la Vía que comunica el Internado sede secundaria del Colegio Pluriétnico de Carurú “COLPEC” al casco urbano del Municipio de Carurú.

3 TEMÁTICA O CONCEPTUAL

El proyecto abarca el desarrollo de un sistema de información donde se evidencia el diagnóstico y se evalúan los resultados y el diseño de las alternativas de construcción de un pavimento, tales como: losas cortas, pavimento rígido y placa huella de la vía anteriormente delimitada a partir de las diferentes evaluaciones efectuadas. A continuación, se va a describir el diseño de tales pavimentos.

3.1 Marco teórico

El dimensionamiento de una estructura para una vía y en particular para el pavimento rígido se fundamenta en el soporte de las cargas aplicadas por el tránsito y se consideran los espectros de carga y sus análisis básicamente se realizan en el centro y en el borde de las esquinas para evaluar el fenómeno de fatiga y erosión. La fatiga consiste en evitar las fallas en el pavimento debido a las repeticiones de esfuerzos críticos y la erosión utilizado para limitar la deflexión que se produce en los bordes, las juntas y las esquinas de las losas de pavimento de concreto, que con presencia de agua produce la erosión de la base granular, fenómeno conocido como bombeo y que están dadas por las características del suelo y de los materiales que la componen. El pavimento rígido son estructuras de materiales técnicamente seleccionados que van apoyados sobre una capa y está va apoyada en la capa de subrasante. Para el diseño del pavimento se contempla la evaluación de la subrasante, el módulo K, módulo elasticidad y el módulo de rotura del concreto. En primer lugar, hay que conocer la capacidad portante de la capa o de las capas sobre las cuales se apoya la estructura del pavimento. Este valor será determinante para la modelación de las diferentes alternativas de diseño que se puedan presentar o evaluar. Uno de los ensayos universalmente aceptados para obtener la capacidad portante es el CBR. Una vez obtenido el CBR de la subrasante se propondrán las soluciones para su mejoramiento o estabilización dependiendo igualmente del diseño geométrico e hidráulico de la vía y de las condiciones geotécnicas de la zona.

La placa - huella con una subbase granular de 15 cm. es un tipo de mejoramiento para vías terciarias y en el cual se pavimenta en concreto, con refuerzo continuo, únicamente la franja por la que circulan las ruedas de los vehículos llamadas huellas. Las placas son conectadas entre sí con una riostra en concreto reforzado que une las dos placas y las bermas-cuneta, con el fin que estas funcionen monolíticamente y los espacios entre las placa-huella, las riostras y las bermas-cuneta se rellenan con una capa de concreto ciclópeo en piedra pegada del mismo espesor de la placa-huella.

4 METODOLOGÍA

Primero se hizo un análisis visual relacionado con el estado actual de la vía donde se pretende realizar el mejoramiento o diseño estructural del pavimento. Posteriormente se realizó el estudio de suelos para evaluar la capacidad portante de la subrasante por medio del ensayo de CBR. Seguidamente se realizó la cuantificación del tránsito. Finalmente, se realizaron los diseños de las posibles estructuras de pavimento (losas cortas, pavimento rígido y placa huella). Asimismo, se realizó una evaluación económica de dichas alternativas de diseño.

4.1 Localización geográfica

El proyecto se encuentra localizado al Noroeste del casco urbano del municipio de Carurú en el departamento del Vaupés. En la Figura 1 y Tabla 1 se ilustra la localización e información del municipio, respectivamente.



Figura 1. Localización del municipio de Carurú.

Fuente: Documento Alcaldía de Carurú.

Tabla 1. Informaciones generales del municipio Carurú

Departamento	Vaupés
Fundación	1967
Erección	7 de agosto 1993
Altitud	185 msnm
Clima	Cálido húmedo
Temperatura	25 a 32 °C
Población	3242 habitantes
Urbana	635 habitantes
Extensión total	6982 Km ²
Extensión área urbana	1200 Hectáreas
Distancia referencia	Capital Mitú 175 Km

4.2 Evaluación de la condición actual de la vía

Para la evaluación de la condición de la vía que comunica el Colegio con el casco urbano del Municipio de Carurú, se realizó una visita de campo para evaluar aspectos de la vía, relacionados con: drenaje, condición de circulación de vehículos y personas, definición y ubicación de los apiques para la determinación de la capacidad de soporte del pavimento. En la Figura 2, se presenta el estado actual, considerando la fecha actual de la realización del presente documento.



Figura 2 Estado actual de la vía: a) punto inicio b) condición actual c) punto intermedio
Fuente: elaboración propia

4.3 Variable subrasante y materiales: fase experimental

Para realizar el diseño estructural es necesario revisar a partir del estudio de suelos la capacidad portante de la subrasante mediante la especificación INVIAS 148 de 2013 para la determinación del índice de resistencia del suelo de subrasante denominado CBR. Este método de ensayo está proyectado para la evaluación de la resistencia del material para obtener el CBR de diseño. Para tal fin, se realizaron cuatro apiques en las abscisas K1+110, K1+380, K1+600 y K1+860 a la profundidad promedio de 0,50 m. Se realizaron los ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas y mediante ensayos según las especificaciones Inviás se determinaron la humedad natural E-122-13, límite líquido E-125-13 límite plástico e índice de plasticidad del suelo E-126-13 y se pudo determinar el CBR de diseño de 3.22 %. En ninguno de los apiques se encontró nivel freático dentro de los 0.50 m de exploración (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Ensayos de caracterización física de la subrasante.

Apique	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	IP (%)	Humedad Natural (%)	CBR (%) 2.54 mm
1	34.73	18.36	16.37	22.6	5.06
2	35.22	17.25	17.97	23.3	3.22
3	38.40	19.39	19.01	24.2	2.68
4	37.84	17.40	20.44	22.8	4.29

Para la determinación del CBR se realizaron cuatro ensayos de las cuatro muestras obtenidas en el campo. A partir de los ensayos, se realizó la determinación del CBR de diseño basado en la selección del percentil determinado en función del tránsito. En este sentido, para el proyecto se tiene contemplado un número de Ejes Equivalentes (EE) de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño (N) entre 10.000 y 1.000.000. Por lo tanto, a partir de las informaciones de la Tabla 3, se determinó que el percentil de diseño es del 75%.

Tabla 3. Determinación del percentil de diseño en función del nivel tránsito.

N	% Diseño
< 10 ⁴	60
10 ⁴ - 10 ⁶	75
> 10 ⁶	87,5

Seguidamente, se organizaron los cuatro datos de CBR de menor a mayor y se estableció el número de valores iguales o mayores para cada caso y su relación porcentual (Ver Tabla 4). A partir del percentil de diseño del 75% se obtiene un CBR de diseño de 3.22%.

Tabla 4. Determinación del CBR de diseño.

CBR	Número de valores iguales o mayores	% De valores iguales o mayores
2.68	4	100
3.22	3	75
4.29	2	50
5.06	1	25

A partir de la determinación del CBR de diseño se obtiene el valor del módulo de reacción compuesto de la subrasante K. Por medio de la Ecuación 1.

$$K = 2,55 + 52,5 \log (\text{CBR}) \text{ para } \text{CBR} \leq 10 \%$$

Fuente: fórmula AASHTO

(1)

4.4 Variable tránsito

Para la determinación de la variable tránsito se tuvieron en consideración solamente buses y camiones con ejes de once (11) toneladas y que actualmente son los más representativos y las máximas permitidas en Colombia. Consideramos del bus dos (2) ejes y del camión dos (2) ejes y de diferentes tipos de maquinaria dos (2) tractores, dos (2) remolques e hicimos una equivalencia de tres (3) ejes y se asumió un tránsito promedio diario como se muestra en la Tabla 5. Se determinó la proyección del tránsito por el modelo lineal ecuación 2 y exponencial ecuación 3 respectivamente para un diseño de 20 años.

Tabla 5. Número de ejes representativos de 11 toneladas

Vehículos	Número de ejes	TPDs	TPDa	No: Tránsito en el año cero	N: Método exponencial	N: Método lineal
Bus	2	20	2080	9412	252904	241888
C2	2	30	3120			
Maquinaria	3	27	4212			

$$N = \frac{n}{2} * [2 * N_0 + (n - 1) * d] \quad (2)$$

Vehículo de diseño: camión tipo C2

N: Numero de ejes de 11 toneladas en el periodo de diseño.

NO: número de ejes en el primer año.

r: tasa anual de crecimiento (3%). Asumida con base en parámetros macroeconómicos de la región.

n: periodo de diseño (20 años).

d: $NO * r$

$N = 241888$

$$N = (N_0) * \frac{(1+r)^n - 1}{r} \quad (3)$$

N = 252904 número de ejes representativos de once (11) toneladas para el periodo de diseño.

4.5 Diseño de pavimentos

En esta sección se va a realizar la explicación del diseño de las losas cortas, del pavimento rígido y de la placa huella, respectivamente. Lo anterior, luego de determinar las respectivas variables de diseño del pavimento, referente a las variables: subrasante, materiales y tránsito.

4.5.1 Losas cortas

Para el desarrollo y modelación de las losas cortas se empleó el software EverFE2.26, herramienta de elementos finitos en 3D que analiza las respuestas críticas del pavimento rígido ante las cargas por ejes, obteniendo como resultado esfuerzos máximos y deflexiones y que se comparan con modelos de fatiga y erosión de la (PCA), para verificar la estabilidad e idoneidad de la estructura.

Se modelaron doce (12) opciones de losas cortas con diferentes módulos de rotura del concreto de $MR1=38 \text{ Kg/cm}^2$, $MR2=40 \text{ Kg/cm}^2$, $MR3=42 \text{ Kg/cm}^2$ y $MR=45 \text{ Kg/cm}^2$ y espesores de concreto de 15, 16 y 17 cm. y de la base granular de 15 y 25 cm. respectivamente y geometría de 1.5 x 2.5 metros para poder comparar los resultados y escoger la modelación más apropiada que cumpla con los parámetros de la PCA.

Los parámetros o datos de entrada de los materiales. Ver tabla 6.

Tabla 6. Materiales

Materiales	
Losa	
Módulo elasticidad concreto E (Mpa): $MR1=25137 \text{ Mpa}$, $MR2=26460 \text{ Mpa}$, $MR3=27783 \text{ Mpa}$, $MR4=29768 \text{ Mpa}$	
Coeficiente de poisson (nu)	0,15
Coeficiente expansión térmica (alpha)	$1,1 \text{ E-5}$
Densidad concreto (Kg/m^3)	2400
Módulo elasticidad acero (Mpa)	200000
Coeficiente de poisson (un) acero	0,3

Subbase	
Módulo elasticidad subbase E (mpa)	120
Coeficiente de poisson (nu)	0,35
Densidad (Kg/m^3)	1944
Módulo reacción subrasante (K) (Mpa/mm)	0,03

Los parámetros o datos de entrada de la carga de los ejes se pueden ver en la tabla 7.

Tabla 7. Eje simple rueda simple – eje simple rueda doble

Eje simple rueda simple (ESRS)		Eje simple rueda doble (ESRD)	
P (eje) (ton.)	6	P (eje) (ton.)	11
P (eje) (KN)	60	P (eje) (KN)	110
Q _{inflado} (psi)	80	Q _{inflado}	80 psi
P (carga contacto) (medio eje) Lb	6725	P (carga contacto) (medio eje) lb	12330
Ac (área de contacto) (mm ²)	54237	Ac (mm ²)	99434
Longitud contacto llanta (mm)	322	Longitud contacto llanta (mm)	436
L (mm)	280	L (mm)	380
W (mm)	193	W (mm)	262
A (largo eje) (mm)	1800	A (largo eje) (mm)	1500
Distancia entre ejes (mm)	4200	B (mm)	300

- Geometría: ingreso la longitud (columna) y ancho (fila) de las losas. El espesor de la losa del concreto y el espesor de la subbase granular.

Ver Tabla 8 y Figura 3.

Tabla 8. Geometría losa de concreto.

Geometría	
Losa 1,5 x 2,0 m	
Longitud X columna 1 (mm)	2000
Longitud X columna 2 (mm)	2000
Longitud X columna 3 (mm)	2000
Ancho Y fila 1 (mm)	1500
Ancho Y fila 2 (mm)	1500
Ancho Y fila 3 (mm)	1500
Espesor (mm)	150-160-170
Sub base	
Espesor (mm)	150-250

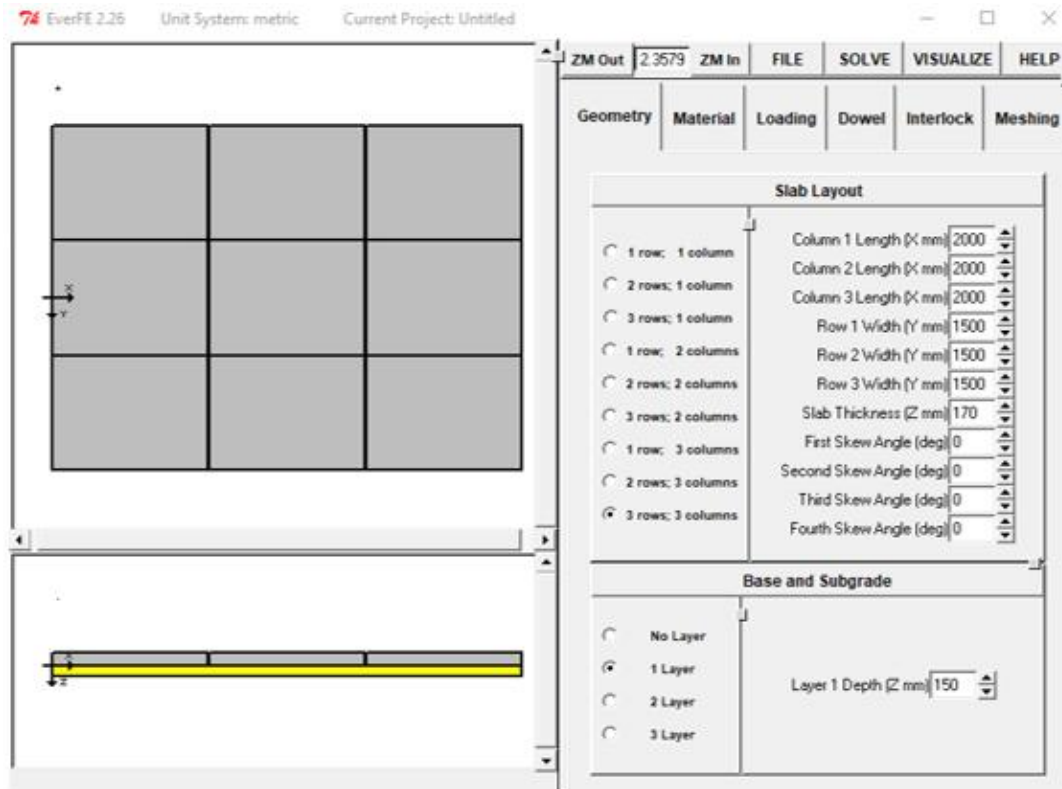


FIGURA 3
Fuente: EverFE2,26

- Materiales: para el concreto ingreso el módulo de elasticidad, coeficiente de poisson, coeficiente de expansión térmica y la densidad. Densidad de la base granular, módulo de elasticidad subrasante, densidad subrasante, módulo de reacción de la subrasante,

módulo elasticidad del acero y coeficiente de poisson del acero. Ver Figura 4.

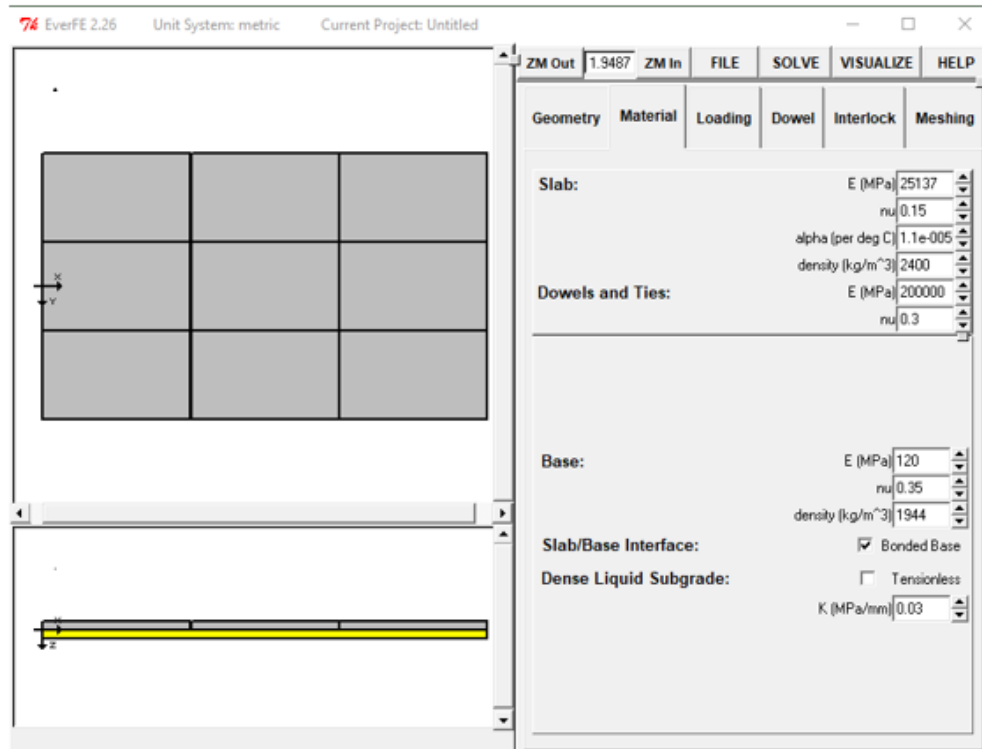


FIGURA 4

Fuente: EverFE2,26

- Cargas ejes camión tipo C2 como se muestra en la Figura 5: ingreso primero la carga del ESRS: 6 toneladas. Ver Figura 7 y luego la carga del ESRD: 11 toneladas. Ver Figura 8 como son área de contacto. Ecuación 4, longitud de contacto llanta. Ecuación 5, largo del eje, distancia entre ejes 4.2 mts., ancho contacto llanta. Ver Figura 5.



FIGURA 5

Tipo camión C2

ESRS: seis (6) toneladas

ESRD: once (11) toneladas

El área de contacto se calcula de la Ecuación 4. Dividiendo la carga del neumático entre la presión de inflado de los neumáticos y el dato obtenido lo remplazamos en la Ecuación 5 para obtener la longitud de contacto del neumático.

$$A_c = \frac{P}{Q(\text{inflado})}$$

(4)

$$L = \sqrt{\frac{A_c}{0,5227}} \quad (5)$$

El método de la PCA supone un área rectangular con longitud de $0.8712 \cdot L$ y un ancho de $0.6 \cdot L$, tienen la misma área de $0.5227 \cdot L$ como se observa en la Figura 5

Obtenido el valor de la ecuación 5, se multiplica por $0.8712 \cdot L$ dato que corresponde al valor de **L** en el software EverFE2.26 y por $0.6 \cdot L$ al valor de **W**.

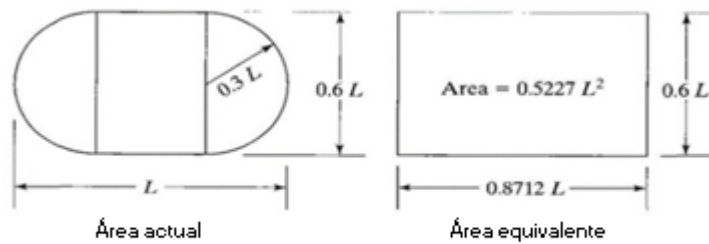


Figura 6 Dimensión área de contacto neumático
Fuente: Yang Huang

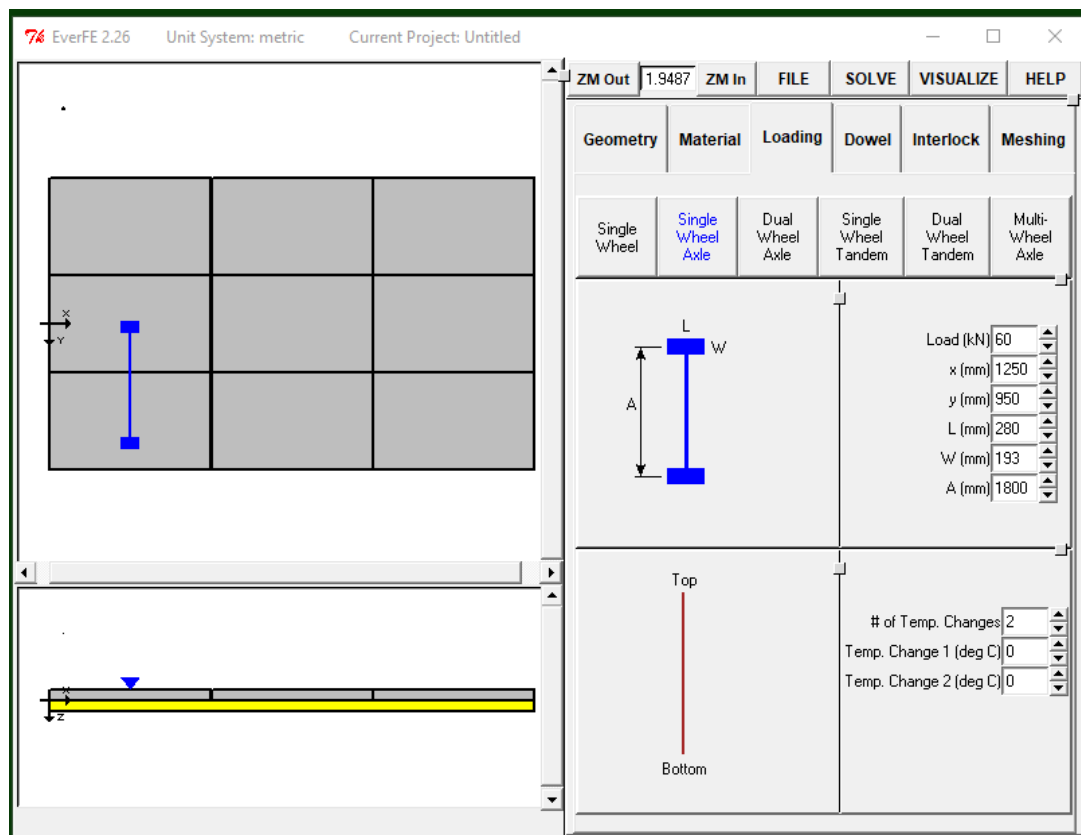


Figura 7. Eje simple rueda simple

Fuente: EferFE2.26

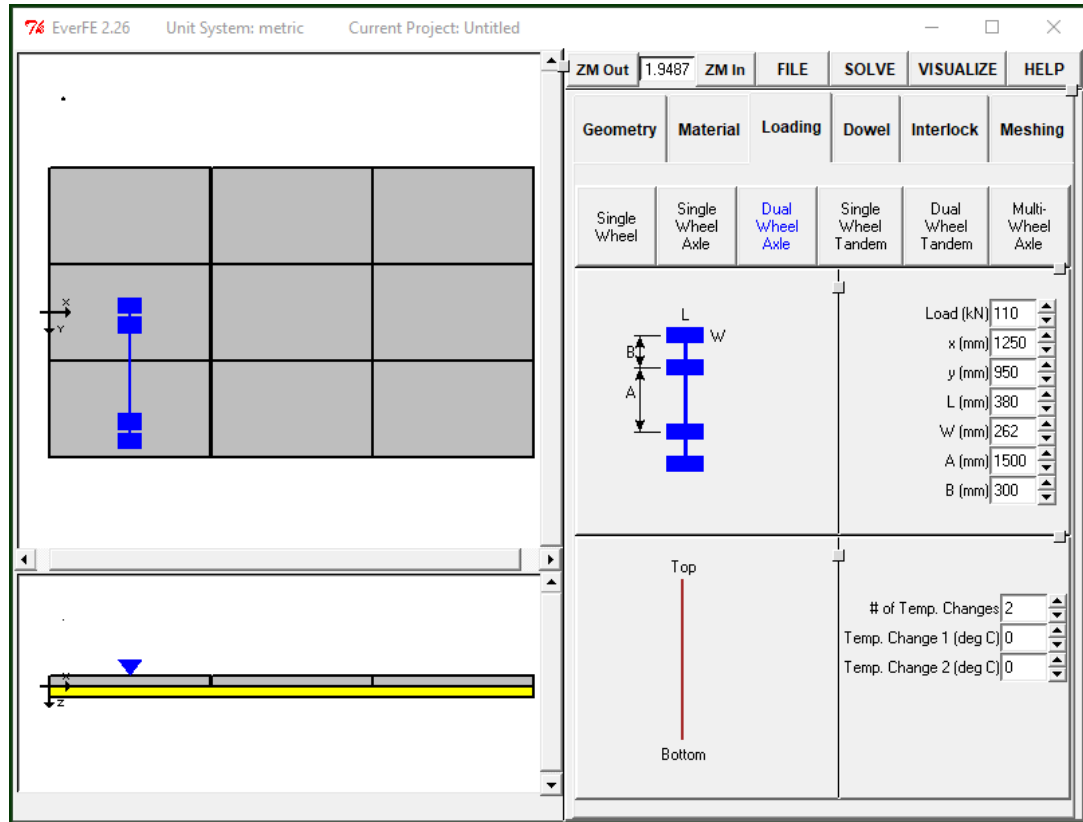


Figura 8. Eje simple rueda doble

Fuente: EferFE2.26

Se evaluarán las cargas de los ejes en el centro – borde, centro – centro, borde – borde y borde – centro de las losas de concreto. Ver Figura 9

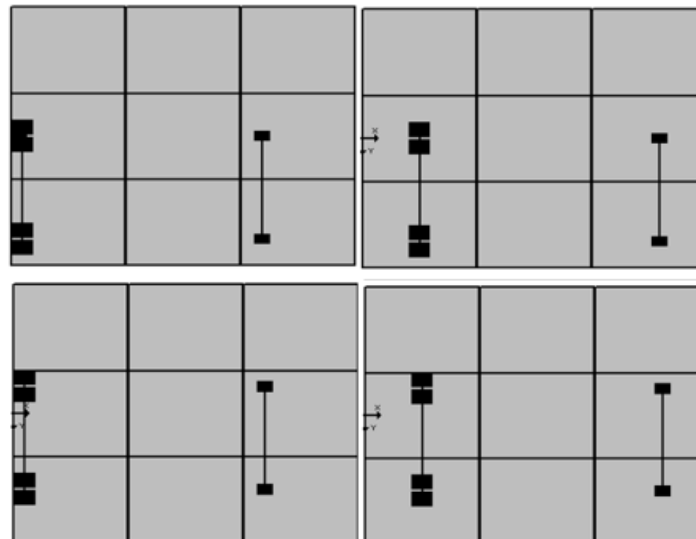


Figura 9

Fuente: EverFE2,26

EverFE2.26 tiene dos opciones básicas para especificar el comportamiento de la trabazón de agregado en las juntas transversales: un modelo lineal y un modelo no lineal. Ver Figura 10.

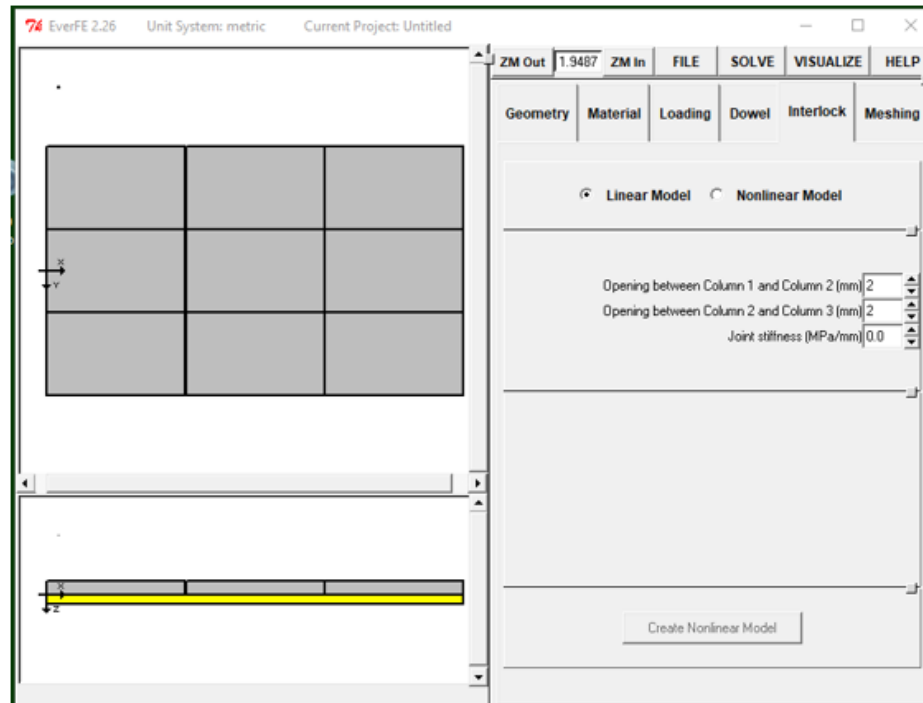


FIGURA 10
Fuente: EverFE2,26

Seleccionar el modelo de trabazón de agregados lineal requiere que se especifique un valor único para la rigidez de juntas, parámetro que se aplica para cada junta transversal en el modelo de elementos finitos.

Las unidades de rigidez en las juntas son rigidez/área (MPa/mm) similar a una rigidez (valor k). Además, se debe especificar una abertura de la junta independiente para cada junta transversal en el modelo. Los valores a utilizar para rigidez en la junta es el valor predeterminado de cero ya que la transferencia de carga se da a través de las dovelas y no por trabazón de agregados y la apertura de las juntas será de 2.0 mm.

4.5.2 Pavimento rígido

Fueron analizadas estructuras de pavimentos contemplando un espesor de base granular de 15 cm y 25 cm. y espesores de concreto de 14, 15, 16 y 17 cm, respectivamente.

Para el desarrollo y modelación del pavimento rígido se empleó el software EverFE2.26, cuyos parámetros o datos de entrada son similares a los presentados en el ítem 4.5.1

referente al diseño de las losas cortas, a diferencia de las características del acero. En este sentido se tiene:

- Acero losas: pasadores de carga (dovelas) varilla diámetro 1" pulgada. Longitud 35 cm. Separación 30 cm. Siete (7) pasadores por losa.

Barras anclaje o barras de amarre varilla No. 4 – diámetro ½" pulgada. Longitud 85 cm. Separación 1.2 mts. Ver Figura 11.

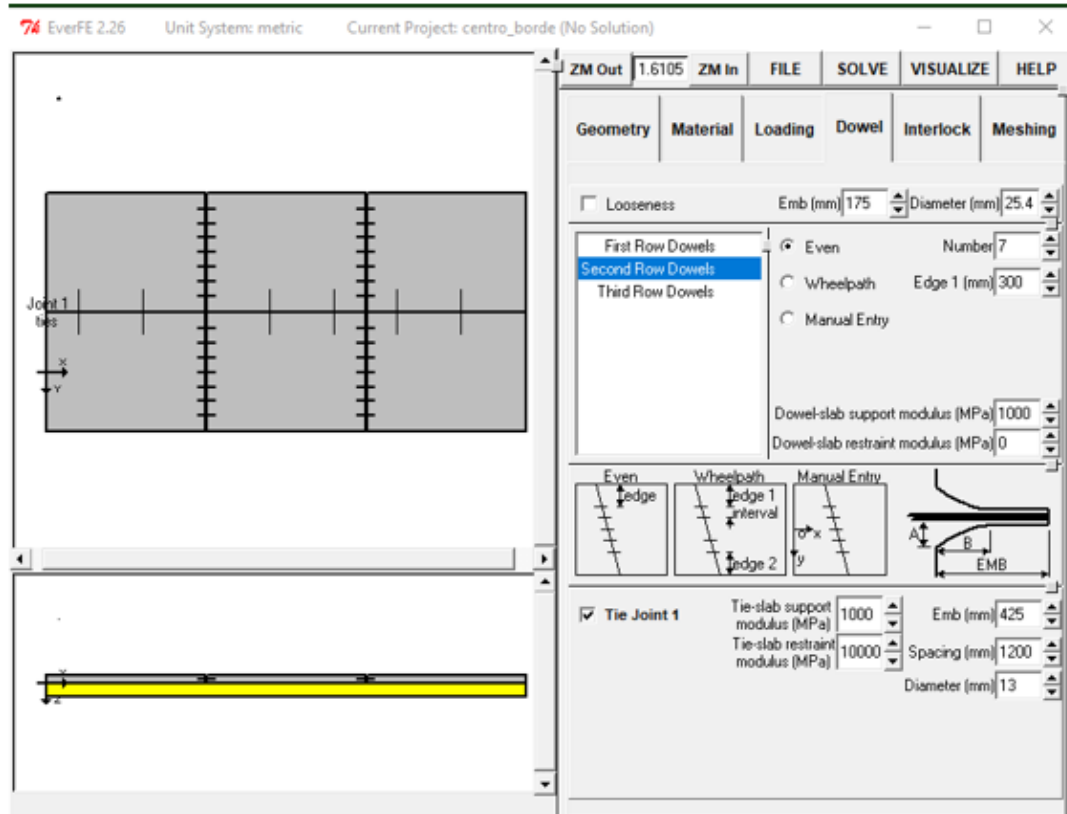


FIGURA 11

Fuente: EverFE2,26

4.5.3 Placa huella

Se siguieron las recomendaciones de la placa huella del manual de INVIAS-201.

La placa - huella es un sistema de pavimentación para vías de bajo volumen de tránsito y se recomiendan para terrenos con una pendiente mayor o igual al 10%.

En el cual se pavimenta en concreto, con refuerzo continuo, únicamente la franja por la que circulan las ruedas de los vehículos huellas. Las placas son conectadas entre sí con una riostra en concreto reforzado que une las dos placas y las bermas-cuneta, con el fin que estas funcionen monolíticamente.

Los espacios entre las placas-huella, las riostras y las bermas-cuneta se rellenan con una capa de concreto ciclópeo, piedra pegada del mismo espesor de la placa-huella.

Los pavimentos en placa-huella se consideran una alternativa económica para redes terciarias con bajo volumen de tránsito.

En la Figura 12 se muestra la geometría de los pavimentos en dos placas – huellas paralelas.

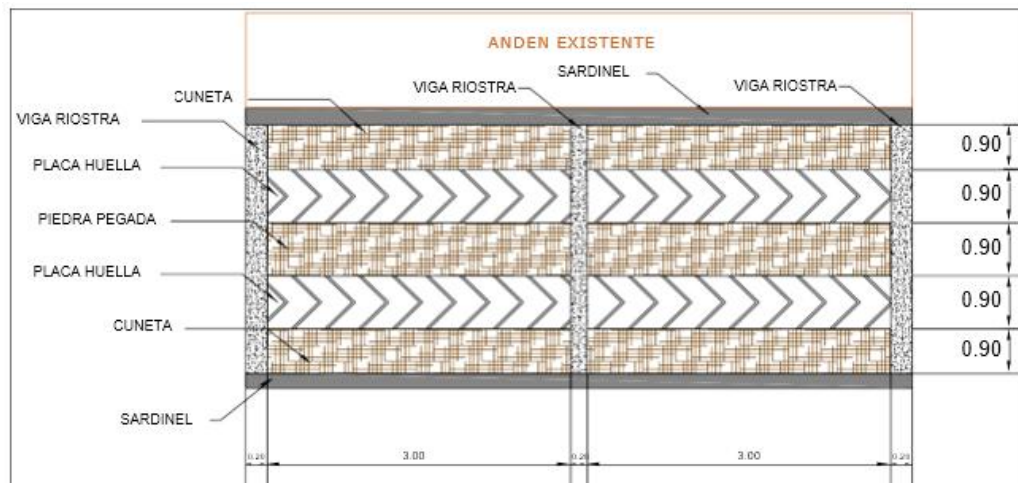


FIGURA 12. Esquema en planta de placa huella
Elaboración propia

Las losas o placas son en concreto reforzado de 3000 psi. Se colocarán en módulos de 3.0 metros y tendrán cada una las siguientes dimensiones: ancho de 0.90 metros, espesor de 0.15 metros y una longitud entre centros de viguetas transversales de 3.0 metros y estará apoyada sobre un material de afirmado de 0.10 m de espesor o suelo cemento que suministra un adecuado soporte a la placa – huella. Entre estas placas se construirá una placa de piedra pegada o concreto ciclópeo de 3000 psi, también en un ancho de 0.90 metros, todas las placas serán arriostradas por unas viguetas reforzadas de 0.20 metros de ancho por 0.30 metros de altura localizadas cada 3.0 metros. Se construirá una cuneta - sardinela con un ancho de 0.90 m. en cada costado. Así, el ancho total de la sección será de 4.50 m. Ver Figura 13

El refuerzo está definido como una armadura de acero en dos direcciones con barras No. (1/4") separadas cada 0,30 m. Las riostras requieren dos aceros No. 3 (3/8") en la parte superior, la misma cuantía de refuerzo en la parte inferior y estribos No. 2 (1/4") cada 0,20 m.

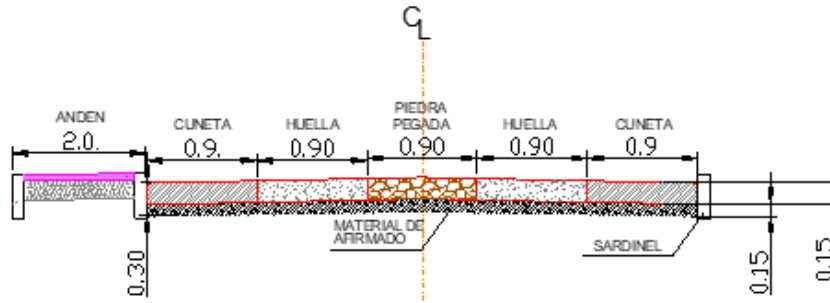


FIGURA 13. Sección transversal típica
Elaboración propia

4.6 Criterios de falla

4.6.1 Análisis por fatiga

El concepto de análisis de la PCA, es evitar las fallas en el pavimento por fatiga debido a las repeticiones de esfuerzos críticos. El método relaciona el esfuerzo máximo por tracción (δ) contra el módulo de rotura del concreto (S_c) en MPa. para determinar los consumos o daños que deben ser menor o igual al 100 %. Ver Ecuaciones 6, 7 y 8.

Cuando la relación de esfuerzo máximo $S_{m\acute{a}x}/MR$ es mayor a 0.45 y menor a 0.55 utilizar la Ecuación 6. Nf (número de repeticiones admisibles)

$$Nf = \left[\frac{4,5277}{\frac{\delta}{S_c} - 0,4325} \right]^{3,268} \quad \text{Para } 0,45 < \frac{\delta}{S_c} < 0,55 \quad (6)$$

Cuando $S_{m\acute{a}x}/MR \geq 0.55$, utilizar la Ecuación 7

$$Nf = 10^{11,737 - 12,077 \left(\frac{\delta}{S_c} \right)} \quad \text{Para } \frac{\delta}{S_c} \geq 0,55 \quad (7)$$

Cuando $S_{m\acute{a}x}/MR \leq 0.45$, utilizar la Ecuación 8

$$Nf = \text{sin l\acute{i}mite para } \frac{\delta}{S_c} \leq 0,45 \quad (8)$$

4.6.2 Análisis por erosión

El concepto de análisis por erosión de la PCA, es utilizado para limitar la deflexión que se produce en los bordes, las juntas y las esquinas de las losas de pavimento de concreto, que con presencia de agua produce la erosión de la subbase granular, fenómeno conocido como bombeo para determinar los consumos o daños que deben ser menor o igual al 100 %

Ver **Ecuación 9 y 10.**

$$P = 268,7 \left[\frac{P_c^2}{h * K^{0,703}} \right] = 268,7 \left[\frac{K^{1,27} * \delta_{eq}^2}{h} \right] \quad (9)$$

$$\text{Log } Ne = 14,524 - 6,777 * (C_1 * P - 9)^{0,103} - \text{Log } C_2 ; \quad C_1 * P > 9 \quad (10)$$

P = índice o relación de trabajo o potencia que relaciona la deflexión en la esquina de la losa (δ_{eq}) y la presión en la interface entre la losa y el suelo de soporte (P_c).

δ_{eq} = deflexión en pulgadas

K = Modulo de reacción de la subrasante en PCI

h = Espesor de la losa en pulgadas

C_1 = factor de ajuste cercano a 1 para **sub bases no tratadas** y decrece hasta aproximadamente 0.90 para **subbases estabilizadas o tratadas**.

Cuando la multiplicación de $C_1 * P$ es mayor a 9 se debe calcular el número de repeticiones admisibles (Ne) con la **Ecuación 10**. Y cuando dicha multiplicación sea menor a 9 quiere decir que el número de repeticiones son infinitas. Ver **Ecuación 11**.

$$Ne = \text{ilimitado} \quad C_1 * P \ll 9 \quad (11)$$

El factor de C_1 a utilizar será 1, debido a que la subbase de diseño no es tratada.

C_2 = 0.06 pavimentos sin berma - 0.94 pavimentos con berma.

5. RESULTADOS

5.1 Losas cortas software EverFE2.26

En la Figura 14, se presentan los esfuerzos máximos en el centro del borde de la losa de las modelaciones realizadas con una capa de soporte de 15 cm y de 25 cm, respectivamente para la tecnología de las losas cortas.

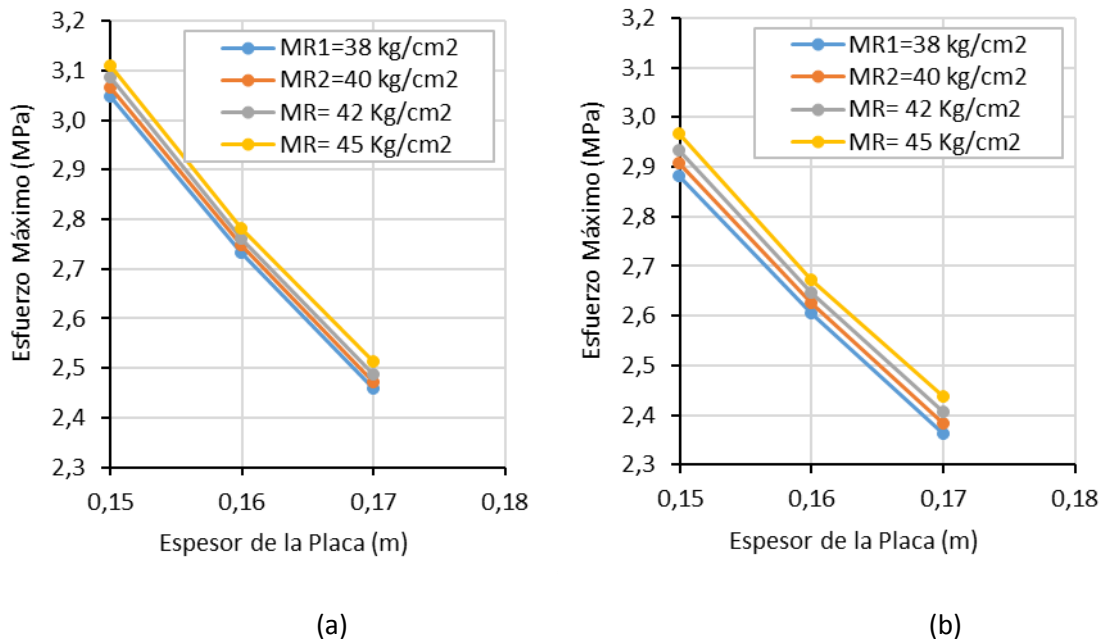


Figura 14. Evolución de los esfuerzos máximos en el centro del borde de la losa. a) capa de soporte de 15 cm.; b) capa de soporte de 25 cm.

A partir de los resultados presentados en la figura 14 es posible evidenciar que los esfuerzos máximos de la losa disminuyen con el aumento del espesor de la losa. Este comportamiento se evidencia para las estructuras que tienen capas de mejoramiento de 15 y 25 cm, respectivamente. Así mismo, es posible evidenciar que los esfuerzos máximos se presentan para las losas que presentan mayor módulo de rotura de concreto, lo cual es atribuido al mayor módulo de elasticidad del material. Por otra parte, se puede evidenciar las estructuras que presentan 25 cm de mejoramiento presentaron una reducción en aproximadamente 4% a 5% del esfuerzo máximo de la losa, para las losas con módulos de rotura de 38, 40, 42 y 45 kg/cm², respectivamente.

En la Figura 15, se presentan las deflexiones máximas en el borde de las esquinas de la losa contemplando una capa de soporte de 15 cm y de 25 cm, respectivamente para la tecnología de las losas cortas.

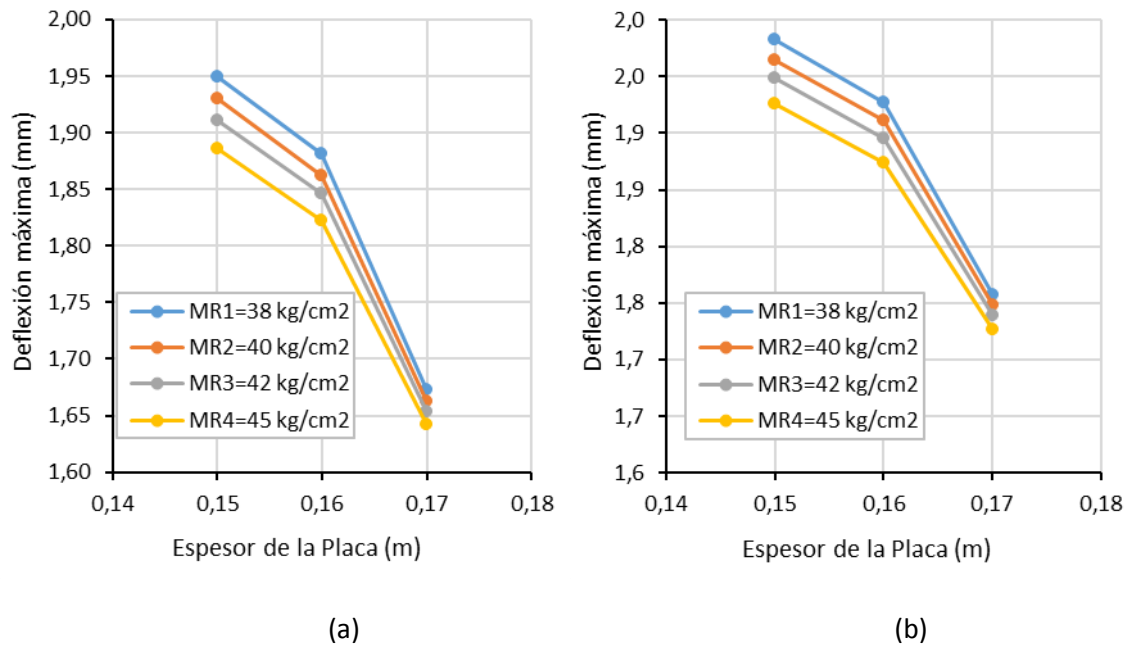


Figura 15. Evolución de las deflexiones máximas en el borde de las esquinas de la losa: a) capa de soporte de 15 cm; b) capa de soporte de 25 cm.

A partir de los resultados presentados en la Figura 15, es posible evidenciar que a medida que el espesor de la placa aumenta, el valor de la deflexión máxima producida en el borde de la losa disminuye. Adicionalmente, los valores máximos de las deflexiones se presentan para las losas de concreto de 38 kg/cm² y va disminuyendo a medida que aumenta el módulo de rotura del concreto. Este comportamiento es evidenciado para las estructuras que tienen una capa de mejoramiento de 15 y 25 cm, respectivamente. Sin embargo, se puede evidenciar que las estructuras que tiene 25 cm de capa de mejoramiento, presentaron un aumento en aproximadamente 2% a 3% de la deformación máxima, en referencia a las estructuras con capa de mejoramiento de 15 cm. ya que la deformación en la losa está relacionada con el consumo por erosión.

En la Figura 16, se presentan los consumos o daño por fatiga en el centro - borde de la losa contemplando una capa de soporte de 15 cm y de 25 cm, respectivamente para la tecnología de las losas cortas. A partir de los resultados de la Figura 16, se puede evidenciar que a medida que aumenta el espesor de la losa de concreto con un mejoramiento de 15 cm. se puede evidenciar una reducción del consumo por fatiga en el centro borde de la losa y con una capa de mejoramiento de 25 cm. los consumos por fatiga de la losa se evidencia una disminución del consumo por fatiga en aproximadamente de 50% a 71%. ya que los esfuerzos máximos disminuyen.

De forma general en la Figura 16 se puede evidenciar que todas las estructuras propuestas **no** cumplen ya que los consumos o daño por fatiga deben ser menor o igual al 100 %. En este sentido, en la Figura 16, se presentan los consumos por erosión en el borde de las esquinas de la losa contemplando una capa de soporte de 15 cm y de 25 cm, respectivamente para la tecnología de las losas cortas.

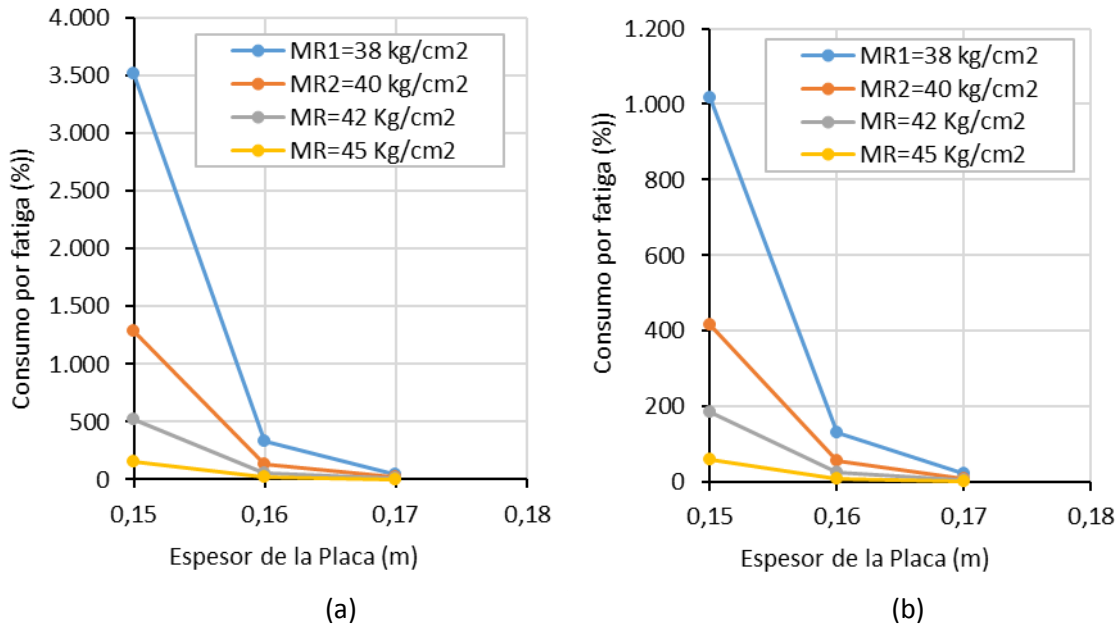


Figura 16. Evolución de los consumos por fatiga de los esfuerzos máximos de la losa: a) capa de soporte de 15 cm; b) a) capa de soporte de 25 cm.

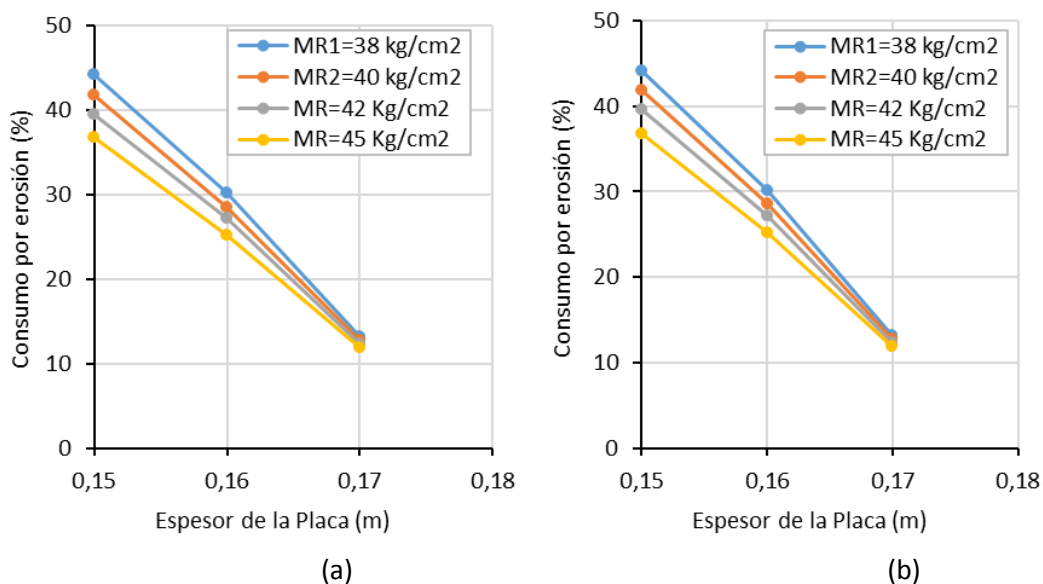


Figura 17. Evolución de los consumos por erosión de las deflexiones máximas de la losa: a) capa de soporte de 15 cm; b) capa de soporte de 25 cm.

A medida que aumenta el espesor de la losa de concreto con un mejoramiento de 15 cm. se puede evidenciar una reducción del consumo por erosión en el borde de la losa y con una capa de soporte de 25 cm. los consumos por erosión también disminuyen, pero aumentan comparándola con el mejoramiento de 15 cm. en aproximadamente 9% a 15% ya que las deformaciones máximas también aumentan. En la figura 17 se puede evidenciar que todas las estructuras propuestas cumplen ya que los consumos o daño por erosión deben ser menor o igual al 100 %.

5.2 Pavimento Rígido

En la Figura 18, se presentan los esfuerzos máximos en el centro de la losa contemplando una capa de soporte de 15 cm y de 25 cm, respectivamente para la tecnología del pavimento rígido.

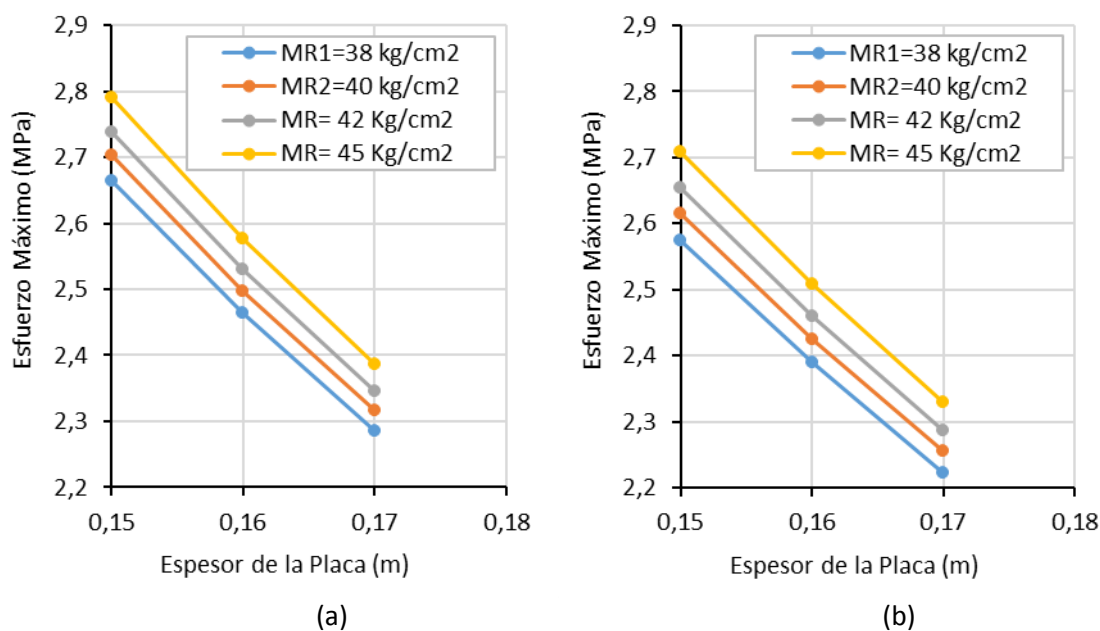


Figura 18. Evolución de los esfuerzos máximos en el centro de la losa: a) capa de soporte de 15 cm; b) capa de soporte de 25 cm.

A partir de los resultados presentados en la figura 18 es posible evidenciar que los esfuerzos máximos de la losa disminuyen con el aumento del espesor de la losa. Este comportamiento se evidencia para las estructuras que tienen capas de mejoramiento de 15 y 25 cm, respectivamente. Así mismo, es posible evidenciar que los esfuerzos máximos se presentan para las losas que presentan mayor módulo de rotura de concreto, lo cual es atribuido al mayor módulo de elasticidad del material.

Por otra parte, se puede evidenciar las estructuras que presentan 25 cm de mejoramiento presentaron una reducción en aproximadamente 3% del esfuerzo máximo de la losa, para las losas con módulos de rotura de 38, 40, 42 y 45 kg/cm², respectivamente.

En la Figura 19, se presentan las deflexiones máximas en el centro - borde de la losa contemplando una capa de soporte de 15 cm y de 25 cm, respectivamente para la tecnología del pavimento rígido.

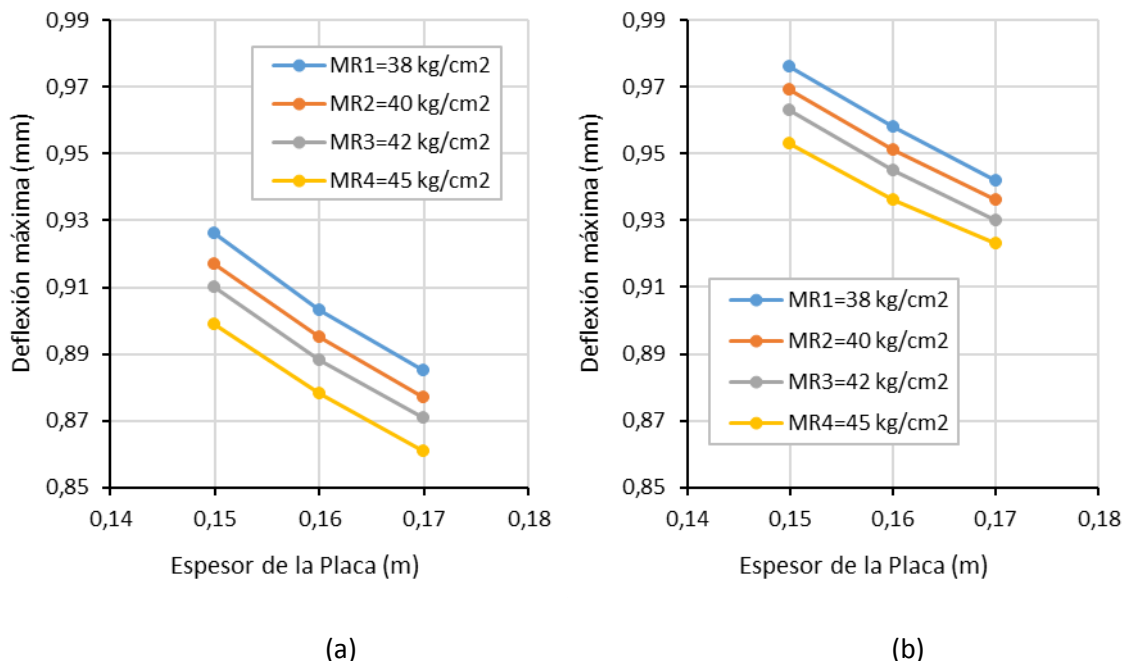


Figura 19. Evolución de las deflexiones máximas en el centro del borde de la losa: a) capa de soporte de 15 cm; b) capa de soporte de 25 cm.

A partir de los resultados presentados en la Figura 19, es posible evidenciar que a medida que el espesor de la placa aumenta, el valor de la deflexión máxima producida en el borde de la losa disminuye. Adicionalmente, los valores máximos de las deflexiones se presentan para las losas de concreto de 38 kg/cm² y va disminuyendo a medida que aumenta el módulo de rotura del concreto. Este comportamiento es evidenciado para las estructuras que tienen una capa de mejoramiento de 15 y 25 cm, respectivamente. Sin embargo, se puede evidenciar que las estructuras que tiene 25 cm de capa de mejoramiento, presentaron un aumento en aproximadamente 5% a 6% de la deformación máxima, en referencia a las estructuras con capa de mejoramiento de 15 cm. ya que la deformación en la losa está relacionada con el consumo por erosión.

En la Figura 20, se presentan los consumos o daño por fatiga en el centro de la losa contemplando una capa de soporte de 15 cm y de 25 cm, respectivamente para la tecnología del pavimento rígido.

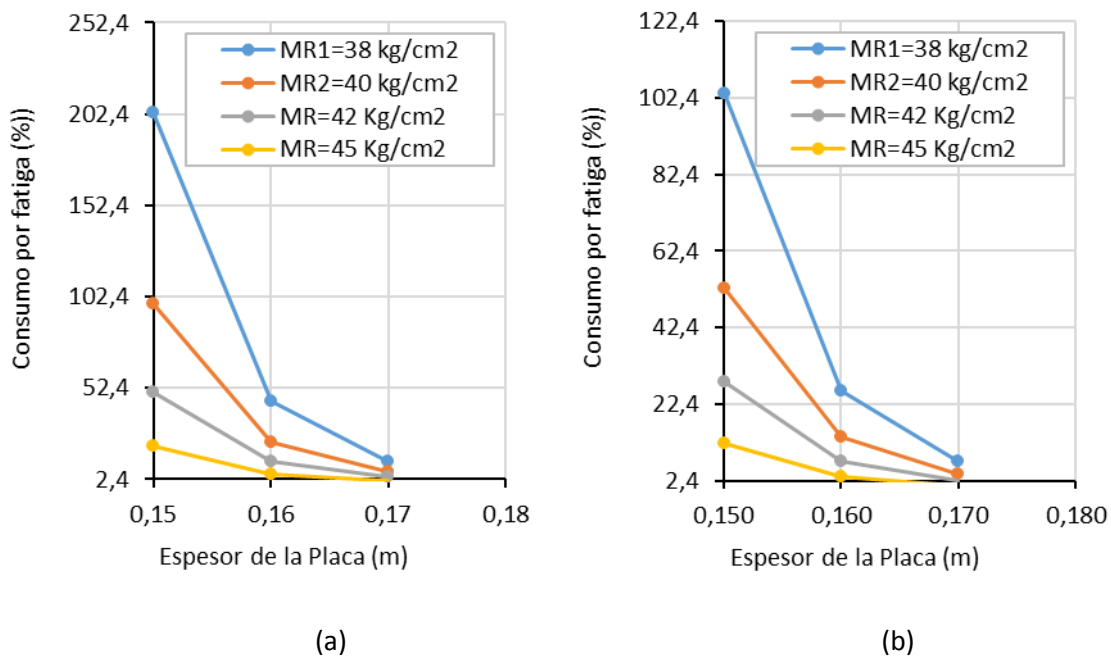


Figura 20. Evolución de los consumos por fatiga de los esfuerzos máximos en el centro de la losa: a) capa de soporte de 15 cm; b) a) capa de soporte de 25 cm.

A partir de los resultados de la Figura 20, se puede evidenciar que a medida que aumenta el espesor de la losa de concreto con un mejoramiento de 15 cm. se puede evidenciar una reducción del consumo por fatiga en el centro borde de la losa y con una capa de mejoramiento de 25 cm. los consumos por fatiga de la losa se evidencia una disminución del consumo por fatiga en aproximadamente de 35% a 49%. ya que los esfuerzos máximos disminuyen. En este sentido, en la figura 19 se puede evidenciar que todas las estructuras propuestas no cumplen ya que los consumos o daño por fatiga deben ser menor o igual al 100 %.

En la Figura 21, se presentan los consumos por erosión en el centro - borde de la losa contemplando una capa de soporte de 15 cm y de 25 cm, respectivamente para la tecnología del pavimento rígido.

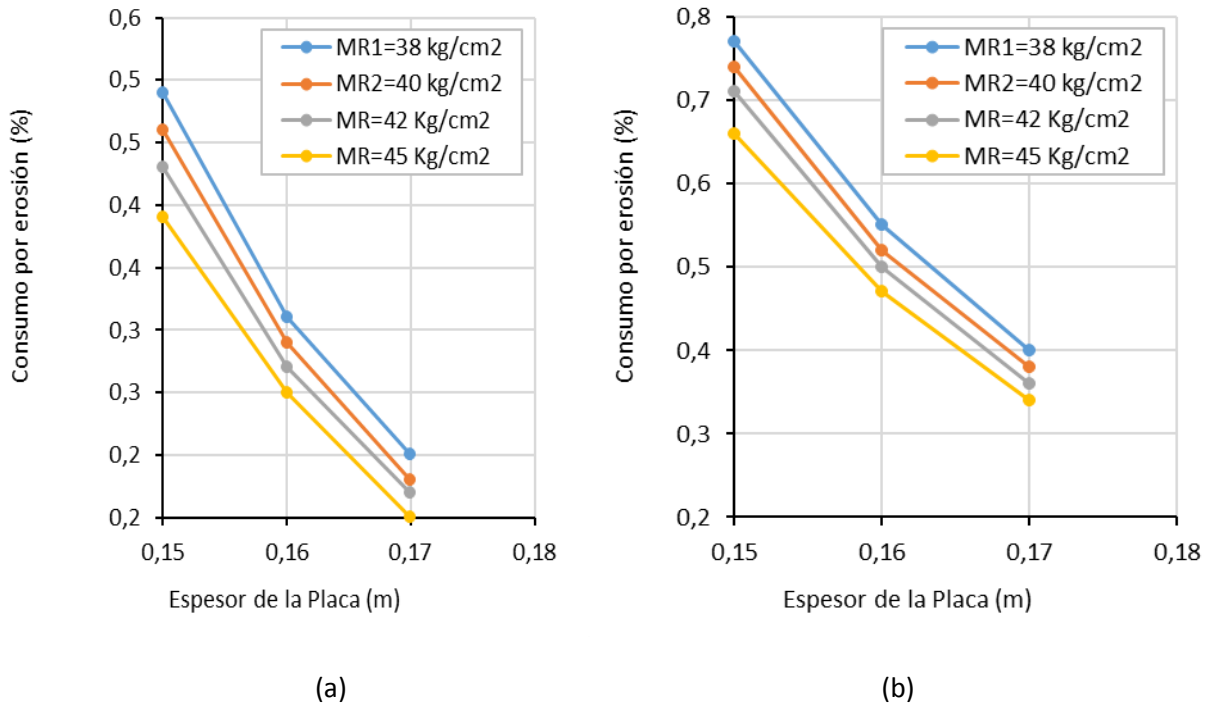


Figura 21. Evolución de los consumos por erosión de las deflexiones máximas de la losa:
a) capa de soporte de 15 cm; b) capa de soporte de 25 cm.

A partir de los resultados de la Figura 21, se puede evidenciar que:

A medida que aumenta el espesor de la losa de concreto con un mejoramiento de 15 cm. se puede evidenciar una reducción del consumo por erosión en el borde de la losa y con una capa de soporte de 25 cm. los consumos por erosión también disminuyen, pero aumentan comparándola con el mejoramiento de 15 cm. en aproximadamente 30% a 37% ya que las deformaciones máximas también aumentan.

En la figura 21 se puede evidenciar que todas las estructuras propuestas cumplen ya que los consumos o daño por erosión deben ser menor o igual al 100 %.

6. ANÁLISIS ECONÓMICOS DE LAS ALTERNATIVAS EVALUADAS

Presupuesto estimado y cantidades de obra más relevantes para cada una de las alternativas recomendadas de las estructuras que cumplen para una vía de 1 Km de longitud. (Análisis de precios unitarios ver anexos)

Como resultado de los análisis de las modelaciones para losas cortas con el programa EverFE2.26 se recomienda losas de 1.5 x 2.5 m. con un mejoramiento de 25 cm. y espesor de la losa 15 cm como estructura más apropiada ya que cumplen con todos los parámetros de la PCA y con módulo de rotura $MR4 = 45 \text{ Kg/cm}^2$.

Como resultado de los análisis de las modelaciones para pavimento rígido con el programa EverFE2.26 se recomienda losas de 2.25 x 3.0 mts. con un mejoramiento de 15 cm. y espesor de la losa 15 cm, losas unidas mediante dovelas colocadas en las juntas transversales asegurando la transferencia de carga entre estas y barras de anclaje en las juntas longitudinales, en dirección perpendicular a la vía como estructura más apropiada y que cumplen con todos los parámetros de la PCA. Concreto de resistencia a flexotracción módulo de rotura $MR2 = 40 \text{ Kg/cm}^2$.

Tabla 9 Presupuesto estimado estructuras

Losas cortas - 1,5 x 2,5 m e = 15 cm.				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
Mejoramiento base e = 25 cm	M3	1.125	\$ 251.550	\$ 282.993.750,00
Concreto $MR4 = 45 \text{ Kg/cm}^2$ e = 15 cm.	M3	675	\$ 3.648.320	\$ 2.462.616.000,00
Total			\$	2.745.609.750,00

Pavimento rígido - Losas 2,25 x 3,0 m. e = 15 cm.				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
Mejoramiento base e = 15 cm	M3	675	\$ 251.550	\$ 169.796.250
Concreto $MR2 = 40 \text{ Kg/cm}^2$ e = 15 cm.	M3	675	\$ 3.388.320	\$ 2.287.116.000
Acero de transferencia liso de 60000 PSI	Kg.	3.241	\$ 13.436	\$ 43.546.076
Acero de refuerzo corrugado de 60000 PSI	Kg.	708	\$ 14.261	\$ 10.096.788
Total			\$	2.510.555.114

Placa huella				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
Mejoramiento base e = 15 cm	M3	675	\$ 251.550	\$ 169.796.250
Concreto $MR2 = 40 \text{ Kg/cm}^2$	M3	270	\$ 3.388.320	\$ 914.846.400
Placa en piedra pegada e = 15 cm.	M3	135	\$ 2.016.460	\$ 272.222.100
Cunetas en concreto	M3	270	\$ 2.200.000	\$ 594.000.000
Acero de refuerzo	Kg.	15.790	\$ 14.261	\$ 225.181.190
Total			\$	2.176.045.940

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con el diseño de las losas cortas no se pretende reemplazar los métodos conocidos y practicados, sino, que sea una alternativa de aplicación en vías principales y terciarias permitiendo el estudio de su comportamiento y grado de confiabilidad para una mejora e implementación futura.
- La selección de los materiales que se van a emplear para las capas de mejoramiento es de vital importancia para proveer a la placa de concreto un soporte continuo y homogéneo, evitando el desgaste por acción del agua, es decir el consumo o daño por erosión. Garantizar buenas condiciones de drenaje de la estructura.
- Las estructuras modeladas cumplen con los parámetros de la PCA.
- Se recomienda optimizar los diseños obtenidos en las modelaciones con el software EverFE2.26 con un valor cercano al 100%, ya que, si se tienen valores menores a dicho porcentaje, se estaría determinando estructuras sobre diseñadas.
- El daño por erosión y fatiga en algunas modelaciones es muy alto lo que significa que posiblemente no alcanzan su periodo de diseño de 20 años en óptimas condiciones lo que hace necesario aumentar la resistencia a flexotracción del concreto.
- Mediante la modelación con el software EverFE2.26 se obtuvo como resultados que los mayores esfuerzos que sufren las losas cortas es en el borde de las juntas y en las losas de pavimento rígido con dovelas y barras de transferencia. Los mayores esfuerzos se encuentran localizados en el centro cuando el espesor de la losa es menor y a medida que aumentemos el espesor de la losa los mayores esfuerzos máximos se encuentran localizados en los bordes de las losas o juntas.
- El software empleado su uso es para determinar tensiones en las losas permitiendo reducir espesores con la misma resistencia a tensión que un pavimento en diseño AASHTO y del manual de diseño de pavimentos concreto INVIAS.
- El pavimento con placa huella ofrece reducir los costos en construcción y mantenimiento respecto a los mismos costos de las otras dos alternativas. En los pavimentos con placa huella por ser rígidos y reforzados la influencia de la rigidez del apoyo es despreciable después de cumplir con unos requisitos mínimos de construcción.

REFERENCIAS

- TC Pavements innovación en Pavimentos. (08 de 04 de 2018). TC Pavement. Obtenido de
- Ordoñez, J. D. (2015). Pavimentos de Losas Cortas de Concreto para Vías Terciarias en Colombia. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Vaerela, L. V. (2018). "Comportamiento de Pavimento de Concreto Simple con juntas de losas Convencionales". *researchgate*, 12.
- Ordoñez, J. D. (2015). Pavimentos de losas cortas de concreto para vías terciarias en Colombia. Universidad Militar Nueva Granada.
- Revista de la Construcción vol.9 no.2 Santiago dic. 2010
- Revista de la Construcción Vo. ISSN: 0378-7680 9 Nº 2 / diciembre 2010 / páginas: 26 – 38
- Covarrubias, J. (2012). Diseño de losas de hormigón con geometría optimizada. En: Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 27 Nº3. Pp 183-186.
- Montejo Fonseca Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Segunda Edición, 1998.
- AASHTO, Guide for desing of pavement structures, 1993.
- RICO, A. DEL CASTILLO, H. La ingeniería de los suelos en las vías terrestres. Vol 1º. México: Editorial Limusa S.A., 1974.
- SHELL. Pavement desing manual. London, 1978.

- Covarrubias, J. P. “losas con dimensiones perfeccionadas para pavimentos de calles, caminos o carreteras y metodología para determinar el diseño de dicha losa”. Chile N° 44820, en EE.UU. N° 7.571.581, y a nivel de la OMPI, N° PCT/EP2006/064732, diciembre, 2012
- Asocreto. (2015). Alternativas para vías terciarias. Bogotá D.C.
- Eskel Hiller, J. (2007). Development of mechanistic-empirical principles for jointed plain concrete pavement fatigue design. United States. UMI. Pp 33.
- ARA Inc. (2007), Interim Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Manual of Practice. Final Draft. National Cooperative Highway Research Program. Pp 1-37.
- Miner, M. A. (1945). Cumulative damage in fatigue. Journal of applied mechanics, 12. Pp 159–164.
- Covarrubias, J. (2007). Pavimentos de concreto con losas de dimensiones optimizadas. TCPavments. Pp 3-6.
- Instituto Nacional de Vías (2013). Determinación del Índice Internacional de rugosidad (IRI) para Medir la rugosidad de los Pavimentos, Bogotá, Colombia, Impreso Ediciones LTDA. Pp 2.
- De la Fuente Lavalle Eduardo. (1995). Suelo-Cemento sus usos propiedades y aplicaciones. México. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.
- Arellano, D. (2015). Rehabilitación de vías terciarias con el sistema de placa huella. Colombia. Repositorio institucional UMNG. Pp 4.

Chávez, O. (2013). Losas cortas: una experiencia en Nicaragua. VII congreso nacional de ingeniería civil. Universidad Nacional de Ingeniería.

Alcaldía de Sibaté en Cundinamarca, Colombia, "Placa - huella en concreto reforzado," Sibaté, 2015.

C. Van, Pavement design and evaluation: the required mathematics and applications, Brussels: Federation of the Belgian Cement Industry, 204.

Arango-Londoño, J.F. "Diseño de pavimentos reforzados: evaluación de factores de carga y subresistencia por el método LRFD," Tecno Lógicas, nº 14, pp. 89-103, 2005.

Ministerio de Transporte, "Límites de pesos y dimensiones de los vehículos de carga en Colombia," Resolución 004100 Ministerio de Transporte, Bogotá DC, 2004.

W. Heukelom y. A. Klomp, "Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction," International conference on the structural design of asphalt pavements, vol. 203, nº 1, pp. 667-685, 1962.

Huang, Y. H. Pavement Analysis and Design, Pearson/Prentice Hall, 2004.

R. G. Packard, "Thickness design for concrete highway and street pavements," Portland Cement Association, 1984.

